

文章编号: 1006-7736(2009)04-0021-04

# 灾害性天气规避及航行方案选优系统<sup>\*</sup>

郭裕芳<sup>1</sup>, 马闯关<sup>1</sup>, 刘翔飞<sup>2</sup>, 刘大刚<sup>2</sup>

(1. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431; 2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为直观了解未来可能遇到的大风浪状况及对未来航线安全做出可靠评价, 提出一种灾害性天气规避及航行方案选优系统。该系统根据多年来对网上气象信息的跟踪和研究, 结合有关船舶驾驶员的问卷调查, 使用风险分析理论和技术, 利用 VC++ 语言编程实现船舶一大风浪区动态显示和航线风险评价及选优等功能。仿真结果表明, 该系统的结果与多位具有丰富远洋航行经验的船长研究讨论的结果基本一致。该系统可为船舶绕避灾害性天气系统时的航线选择提供重要的参考依据。

**关键词:** 船舶安全; 风险分析; 灾害性天气; 绕避方案; 航线选优

中图分类号: U 698

文献标志码: A

## Disaster weather avoiding and optimal sailing route selecting system

GUO Yu-fang<sup>1</sup>, MA Chuang-guan<sup>1</sup>,LIU Xiang-fei<sup>2</sup>, LIU Da-gang<sup>2</sup>

(1. China Satellite Maritime Tracking and Control

Department, Jiangyin 214431, China;

2. Navigation College, Dalian Maritime

University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** To directly understand the situations of strong wind and huge waves may be encountered in the future while evaluating the safety of future route, a disaster weather avoiding and optimal sailing route selection system was proposed. Based on tracing and studying meteorological information for years on internet, the system realized such functions, as dynamic display of ship-disaster sea area, route risk evaluation, excellent selection, etc, using VC++ language and combining questionnaires to ship officers with the risk analysis theory and technique. Simulations show that the result from the proposed system matches well with that discussed by a group of experienced captains which can provide important reference to optimal route selection

for avoiding disaster weather.

**Key words:** ship safety; risk evaluation; disaster weather; avoiding route; route optimal selection

## 0 引言

当船舶绕避大风浪天气系统或大风浪区时, 所制定的绕航方案必须满足 2 个条件: 一是必须保证船舶的航行安全, 即一定要绕开对船舶构成威胁的大风浪区<sup>[1]</sup>; 二是在能保证船舶航行安全的条件下, 尽可能少绕远, 尽量节省船期和燃油消耗<sup>[2]</sup>。为了能够直观、方便、快捷地了解未来航线上的大风浪等水文气象信息对船舶航行可能造成的威胁, 让决策者有效地选择既保证船舶航行安全, 又尽量节省航时和燃油的绕航方案, 本文提出一种灾害性天气规避及航行方案选优系统, 可对船舶在未来 2~3 天内所遇到的大风浪情况进行动态显示, 并对各条未来可能航线进行预先风险度估算, 为航线优选提供辅助决策。

## 1 船舶一大风浪区的动态显示

### 1.1 天气系统和天气区

热带气旋、强烈发展的锋面气旋(尤其是爆发性锋面气旋)和冬半年强冷高压等危险天气系统均会造成大洋和近海海区大范围的狂风恶浪, 由此引发的船毁人亡事故时有发生<sup>[3]</sup>。对具有丰富航行经验的远洋船长调查情况看, 风和浪应是重点关注的水文气象信息, 其对船舶航行安全威胁较大。在实际使用时, 主要考虑气象部门在网上发布的大风、大浪警报区。

### 1.2 大风浪区强度和范围确定

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-06-15.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG18B03).

作者简介: 郭裕芳(1955—), 男, 江苏常州人, 硕士, 船长, E-mail: betsybn@hotmail.com.

本系统所使用的气象水文信息主要来自对气象和海洋预报部门在因特网上提供的多年天气图的跟踪及研究,其中大风要素来源于中国中央气象台地面实况、24 h 和 48 h 地面预报;大浪要素来源于中国国家海洋局 / 日本 JMH 海浪的实况、预报。

1.3 船舶一大风浪区动态标绘

船舶、天气系统及其强度和范围处于运动状态,为此提出一种大风浪强度和范围的动态标绘方法,其具体步骤为:

(1)通过人机对话方式,在地图上输入船舶的起始位置及各条可能使用的航线,根据船舶的具体情况设定航线风险等级阈值。

(2)向系统输入大风、大浪区实况和不同时段预报情况,在后台计算某时段(如 48 h)内不同时间节点(时间步长可设为 3 h 或 6 h)相应的大风浪场。

(3)根据每一时间节点船位和大风浪场情况,输入各时段内船舶所处风浪场具体情况(如风级、浪高、风浪舷角等)。在分析大风浪中船舶失速情况和不同等级风险的隶属情况的基础上,进一步计算在该时段内船舶的失速和风险等级情况。

(4)动态显示上述船舶位置和风浪场,获得动态的船舶一大风浪区相对位置图后,可按需要计算出各条航线的风险度情况和航行时间,根据已确定的风险等级阈值,自动舍去风险度过大的航线。在确定优选航线的评价条件后,即可自动给出满足评价条件的最优航线。

2 航线安全性评价

2.1 航线风险度等级确定

为事先评价船舶航线风险度,可采用风险分析理论和技术方法,对可能的航线进行风险评价<sup>[4]</sup>。根据对船公司的走访和对相应船舶的调查,将航线风险划分为 3 个等级(表 1)。

表 1 航线风险度等级及其含义

风险度等级	名称	含义
I	有较小风险	船舶可在此状态下航行,但应注意在必要时,须严格遵守大风浪航行的有关规定
II	有较大风险	对船舶安全存在较大威胁,船舶应尽可能避免较长时间在此状态下航行
III	风险极大	对船舶安全存在严重威胁,船舶应完全避免在此状态下航行

2.2 风浪情况对航行安全影响的调查

使用专家经验评定方法,获得不同类型船舶在不同大风浪状态下达到不同风险等级的概率。本文中大风等级分为<7 级、7 级、8 级、≥9 级四种状态;

大浪等级分为<2 m、2~3 m、3~4 m、4~5 m、≥5 m 五种状态;风浪舷角分为 0°、45°、90°、135°、180°五种状态。在不同等级的大风或大浪作用下,可分别出现 5 种不同风浪舷角的航行状态,即可分别获得船舶航线风险等级与风和浪两个影响因子间的模糊隶属关系,如表 2 所示。

表 2 各级风险的隶属度

隶属度	含义
0.0	不可能
0.1~0.4	← 减小
0.5	临界
0.6~0.9	增大→
1.0	必定

2.3 航线风险度的评价模型

对应于每一种航行状态,在风的影响下存在不同等级风险的模糊矩阵,可表示为

$$R_1(t) = \begin{matrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} \\ \begin{matrix} < 7 \\ 7 \\ 8 \\ \geq 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11}^{(1)}(t) & r_{12}^{(1)}(t) & r_{13}^{(1)}(t) \\ r_{21}^{(1)}(t) & r_{22}^{(1)}(t) & r_{23}^{(1)}(t) \\ r_{31}^{(1)}(t) & r_{32}^{(1)}(t) & r_{33}^{(1)}(t) \\ r_{41}^{(1)}(t) & r_{42}^{(1)}(t) & r_{43}^{(1)}(t) \end{bmatrix} \end{matrix}$$
$$= (\alpha_1^{(1)}(t), \alpha_2^{(1)}(t), \alpha_3^{(1)}(t)) \tag{1}$$

在浪的影响下存在不同等级风险的模糊矩阵为

$$R_2(t) = \begin{matrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} \\ \begin{matrix} < 2 \\ 2 \sim 3 \\ 3 \sim 4 \\ 4 \sim 5 \\ \geq 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} r_{11}^{(2)}(t) & r_{12}^{(2)}(t) & r_{13}^{(2)}(t) \\ r_{21}^{(2)}(t) & r_{22}^{(2)}(t) & r_{23}^{(2)}(t) \\ r_{31}^{(2)}(t) & r_{32}^{(2)}(t) & r_{33}^{(2)}(t) \\ r_{41}^{(2)}(t) & r_{42}^{(2)}(t) & r_{43}^{(2)}(t) \\ r_{51}^{(2)}(t) & r_{52}^{(2)}(t) & r_{53}^{(2)}(t) \end{bmatrix} \end{matrix}$$
$$= (\alpha_1^{(2)}(t), \alpha_2^{(2)}(t), \alpha_3^{(2)}(t)) \tag{2}$$

当获得船舶在某一航行方案的某一段航程内的风浪等级和风浪舷角后,则该船此段航程内的风险等级可表示为

$$A_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}) \tag{3}$$

$$A_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}) \tag{4}$$

其中,  $a_{1i}$  和  $a_{2i}$  分别为不同等级大风、大浪出现概率。

在大风的作用下,该航行方案危险等级模糊子集为

$$B_1 = (\max_{1 \leq i \leq 4} \{A_1 \circ \alpha_1^{(1)}(t_i)\}, \max_{1 \leq i \leq 4} \{A_1 \circ \alpha_2^{(1)}(t_i)\}, \max_{1 \leq i \leq 4} \{A_1 \circ \alpha_3^{(1)}(t_i)\}) = (x_1, x_2, x_3) \tag{5}$$

其中,  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为在大风作用下,出现不同等级危险的风险度,同样,对于大浪的作用,有

$$B_2 = (\max_{1 \leq i \leq 5} \{A_2 \circ \alpha_1^{(2)}(t_i)\}, \max_{1 \leq i \leq 5} \{A_2 \circ \alpha_2^{(2)}(t_i)\}, \max_{1 \leq i \leq 5} \{A_2 \circ \alpha_3^{(2)}(t_i)\}) = (y_1, y_2, y_3) \quad (6)$$

其中,  $y_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为在大浪作用下, 出现 I、II、III 危险等级的风险度。

在大风浪共同作用下, 船舶危险度等级的模糊评定结果为

$$B = (z_1, z_2, z_3) \quad (7)$$

其中,  $z_i = x_i + y_i - x_i y_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为船舶出现不同危险等级的风险度<sup>[9]</sup>。

对某一航行方案, 其整个航程的风险度, 可用各段航程中风险隶属度最大者来表示。针对获得的船舶在未来航线上的风险度指数, 可根据事先确定的风险度阈值, 舍去风险过大的航行方案, 余下方案即为可选用的航行方案。

3 最优航线选择

3.1 航线选优条件的确定

针对上述已选可行航行方案, 可根据不同选优原则来选取最优航行方案。若仅考虑快速性, 则可根据事先调查得到的船舶在大风浪中的失速情况, 获得船舶在不同航线上的航行时间, 则航时最短的航线即为最优航线。但如有其他特殊要求(如燃油消耗等), 则需综合考虑各种条件以获得最优航线。

3.2 船舶失速情况的确定

船舶在实际大风浪中航行时发生的减速为自然减速与主动减速之和<sup>[6]</sup>。研究船舶自然减速的方法有多种, 如理论计算、水池风洞模拟、根据实测资料进行统计分析归纳出公式等<sup>[7]</sup>。本文采用专家问卷调查方法, 调查在同型姊妹船上工作过的船长、轮机长, 全面综合考虑上述两方面情况, 得出特定船舶在大风浪中更为客观实际的失速情况。

4 系统简介

本系统主要由船舶一大风浪区动态显示、船舶可用航线风险评价、航线优化选择三个功能模块组成。在实际使用时, 系统根据大风浪实况和预报情况自动生成每 3 h 或 6 h 一次的大风浪场, 将船舶航速、航程起止位置、可能执行的航线输入到系统中, 依次输入每 3 h 或 6 h 一个时次船舶在不同航线上将遇到的风浪(风级、浪高、风浪舷角等)情况。经后台处理, 即可得到每 3 h 或 6 h 一次的船舶一大风浪情况的动态显示, 并可根据命令进行连续播放或单幅显示, 使船舶安全管理人员清晰地观察船舶在不

同时间处于不同强度大风浪的情况及其位置。针对不同的可能航线进行风险估算, 获得各条航线隶属于不同风险等级的风险度, 根据事先设定的风险度阈值, 即可舍去风险等级过高的航线。对符合安全要求的航线, 可进一步计算航行时间, 根据时间最短原则, 即可确定最佳航线。整个系统流程图见图 1。

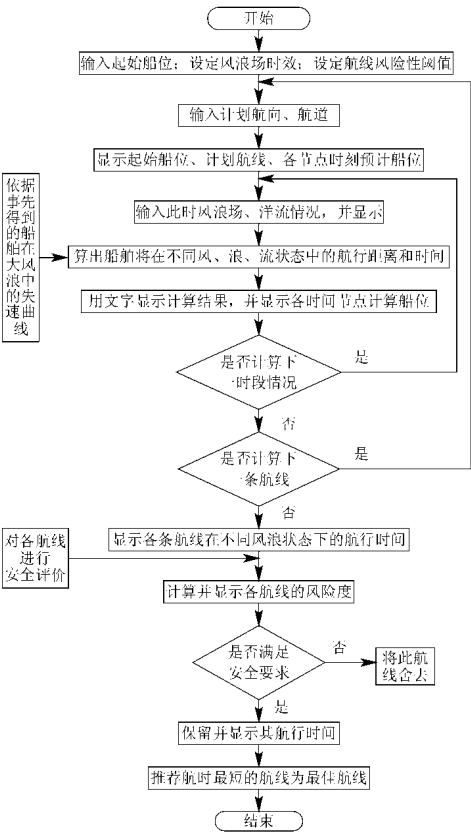


图 1 系统操作流程

5 仿真实例

根据上述原理, 对某船在中国南海海域航行时的航线选择进行仿真实验。该船正常航速为 18 kn, 在不同等级风浪条件下, 对驾驶员进行专家问卷调查, 得到失速和风险等级模糊矩阵情况, 见表 3~5。

表 3 某船在不同等级风浪条件下的失速情况 kn

风级/级	风舷角/(°)				
	0	45	90	135	180
< 7	+0.5	+0.8	-0.1	-0.9	-0.6
7	+0.7	+1.0	-0.2	-3.5	-4.0
8	+0.9	+1.1	-0.2	-6.5	-7.0
≥ 9	—	—	—	—	—
浪高/m	风舷角/(°)				
	0	45	90	135	180
< 2	+0.3	+0.5	-0.1	-0.6	-0.4
2~3	+0.5	+0.8	-0.1	-0.9	-0.6
3~4	+0.7	+1.0	-0.2	-3.5	-4.0
4~5	+0.9	+1.1	-0.2	-6.5	-7.0
≥ 5	—	—	—	—	—

表 4 风舷角为 0° 时在风作用下的模糊风险矩阵

风级/级	风险等级		
	I	II	III
< 7	0.1	0.0	0.0
7	0.3	0.5	0.0
8	0.1	0.8	0.5
≥ 9	0.0	0.0	1.0

表 5 浪舷角为 0° 时在浪作用下的模糊风险矩阵

浪高/m	风险等级		
	I	II	III
< 2	0.0	0.0	0.0
2~3	0.1	0.0	0.0
3~4	0.3	0.5	0.0
4~5	0.1	0.8	0.5
≥ 5	0.0	0.0	1.0

2008 年 12 月 22 日 0000UTC, 某船从汕头港出发, 航线及该时风浪情况见图 2、3。

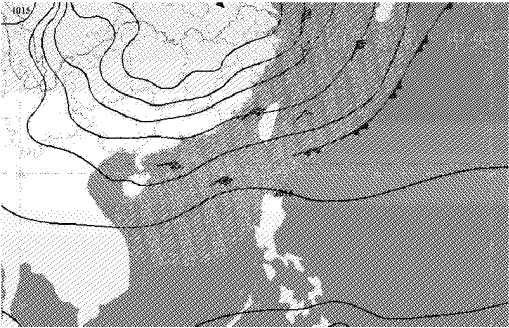


图 2 2008 年 12 月 22 日 0000UTC 风场实况

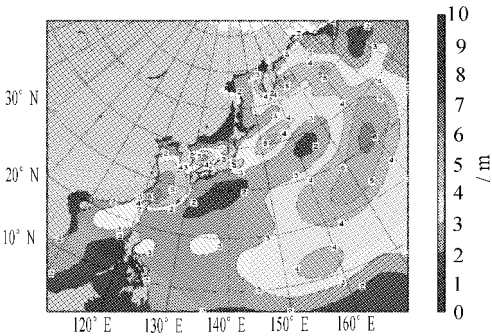


图 3 2008 年 12 月 22 日 0000UTC 海浪实况

将上述风浪实况信息和可以选用的航线输入到系统中, 见图 4。再将气象部门预报的 24 h 和 48 h 的风浪信息输入到系统中, 获得每 6 h 一次的船舶—风浪场动态显示效果, 见图 5。各条航线隶属于不同风险等级的隶属度值见图 6。

根据预先设定的风险等级阈值, 舍去风险过高的航线, 获得保证航行安全的航线及按这些航行方案航行至结束点的航行时间, 如图 7 所示。

由本例中的具体计算结果可知, 方案 2 航行时间为 67.0 h, 较方案 1 快 2.1 h, 为本例的最优航行

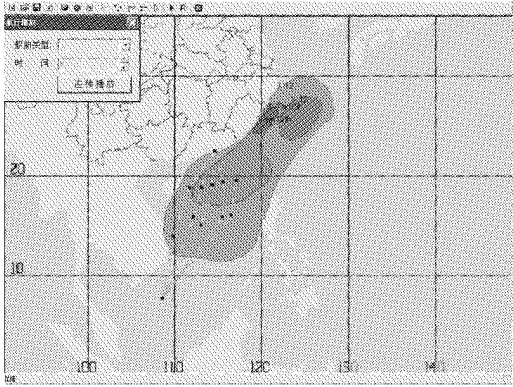


图 4 航线和风浪场的输入

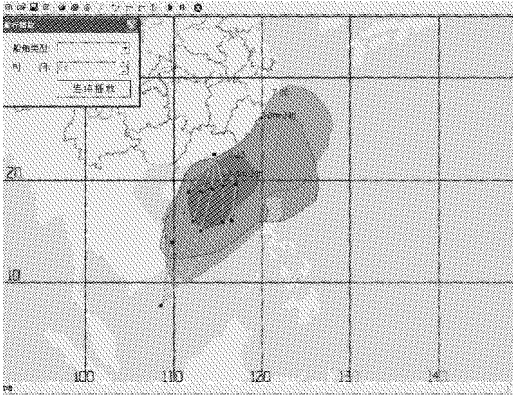


图 5 船舶—大风浪场的动态显示

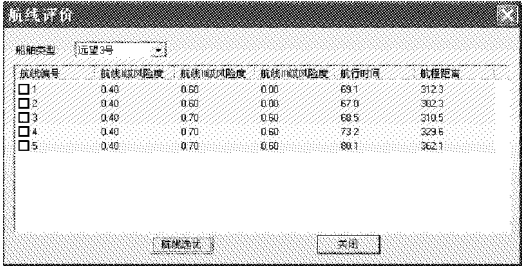


图 6 航线风险度估算结果

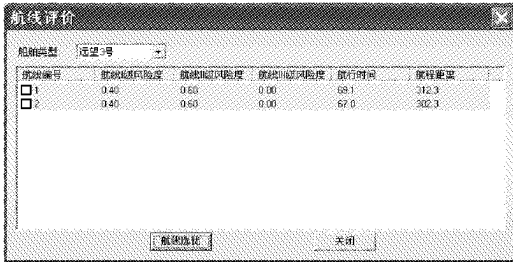


图 7 航线选优结果

方案。

(下转第 29 页)

## 4 走锚预报

锚泊船在偏荡过程中,锚链力的变化使卧底链长也会有所变化,锚抓力也随之改变,且随着锚链力的变大,卧底链长会变短,锚抓力也会变小.当锚链力大于锚抓力时,就会发生走锚现象.走锚时,锚链力会维持在较大的值,而锚抓力就是锚的最大动抓力,即式(9)表示的抓力.走锚的条件为

$$F_{T_H} > \lambda_1 W + \lambda_2 w_l l_0 \quad (15)$$

利用式(13)可以求出出链长度与最大锚链力的关系,从而得出安全出链长度.经过计算拟合,“育龙”轮压载时安全出链长度与风速的关系为

$$L_c = (0.04v_a^2 - 0.8v_a + 13.9)h$$

安全出链长度与流速的关系为

$$L_c = (2.83v_c + 6.34)h$$

考虑到最坏的情况,即风、流合力在锚泊时同时达到最大且同向,则风、流中“育龙”轮压载的安全出链长度为

$$L_c = (0.04v_a^2 - 0.8v_a + 2.83v_c + 20.2)h$$

需要注意的是,当风速大于  $25 \text{ m/s}$  时,单锚泊很难控制走锚的发生,此时应抛双锚或者利用车舵配合使用以防止走锚的发生.

## 5 结 论

本文通过 Matlab 仿真算法来模拟单锚泊船在

风流中的周期性偏荡运动,得出锚泊船在偏荡运动中锚链力受外界干涉力影响的变化趋势.结果表明:当风速较大时,最大风舷角相对较大,船舶的偏荡较为激烈,同时在一定受风面积的情况下,船舶所受风压力较大.此时,应适当增加出链长度,保证足够的锚抓力,同时也在一定程度上缓解偏荡的激烈程度,但应注意周围是否有足够的水域.推导出在不同风力情况下的安全出链长度估算公式.

参考文献(References):

- [1] 古文贤. 单锚泊船的偏荡运动[J]. 世界海运, 1996(4): 51-54.
- [2] 洪碧光. 风流作用下船舶的低频振荡分析及走锚预报[J]. 大连海运学院学报, 1989, 15(2): 1-9.
- [3] 邓 涛. 单锚泊船在强流中的偏荡建模及研究[C]//船舶安全管理论文集. 广州: 中国航海学会船舶驾驶专业委员会, 2008: 182-188.
- [4] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [5] ISHERWOOD R M. Wind resistance of merchant ship[J]. Trans of RINA, 1973 115: 327-338.
- [6] 廖何树, 蒋维清, 叶宝聪. 船舶走锚预报数学模型[J]. 中国航海, 1995(1): 1-8.
- [7] 杨林家, 杨佐倡, 于 洋. 船舶走锚预警系统[J]. 大连海事大学学报, 2005, 31(1): 29-31.

(上接第24页)

## 6 结 语

目前,大气科学发展的局限性导致无法准确预报大风浪,且时限越长预报的准确率就越低.因此,船舶在航行时会临时改变计划航线以规避无准确预报的大风浪等灾害天气区.在对大风浪区进行规避时,如能对船舶一大风浪区的相对位置情况给出动态显示,并对各条可能规避航线进行事先风险估算,则可为船舶驾驶员优选航线提供科学有效的辅助决策依据.本文提出的灾害性天气规避及航行方案优选系统,为有效地解决上述问题提出了一种设想,并得到初步实现.

参考文献(References):

- [1] 刘大刚,李志华. 大风风力预报准确率的统计特征分析

[J]. 大连海事大学学报, 2003, 29(4): 47-49.

- [2] 刘大刚, 李国平, 吴兆麟. 气象-经济决策理论在大风浪中船舶航线的选优应用[J]. 中国航海, 2004, 61(4): 1-4.
- [3] 王凤武, 郑中义, 吴兆麟. 大风浪船舶安全航行的研究综述[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(4): 61-64.
- [4] 刘大刚, 郑中义, 吴兆麟. 大风浪中航行船舶风险体系分析[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2): 100-102.
- [5] 刘大刚, 徐东华, 吴兆麟. 大风浪中航行船舶的危险度估算模型[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(3): 83-86.
- [6] 王凤武. 船舶在风浪中航行失速问题探讨[J]. 世界海运, 1998, 4: 8-9.
- [7] 王凤武, 贾传荧. 船舶抗风浪等级的研究[J]. 大连海事大学学报, 1998, 24(1): 61-63.